

*На правах рукописи*

Седунин Вячеслав Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОГО  
КОМПРЕССОРА ГТУ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ВХОДНЫМ  
НАПРАВЛЯЮЩИМ АППАРАТОМ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2011

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» на кафедре «Турбины и двигатели»

Научный руководитель: заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» УрФУ, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук РФ  
Бродов Юрий Миронович

Научный консультант: доцент кафедры «Турбины и двигатели» УрФУ, кандидат технических наук  
Комаров Олег Вячеславович

Официальные оппоненты: заведующий кафедрой "Механика многофазных систем" Тюменского государственного университета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ  
Шабаров Александр Борисович  
заведующий кафедрой "Сооружение и ремонт нефтегазовых объектов" Тюменского государственного нефтегазового университета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник газовой промышленности  
Иванов Вадим Андреевич

Ведущая организация: ЗАО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург

Защита состоится 14 октября 2011г. в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5, ауд. Т-703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, учёному секретарю университета. Тел.: (343) 375-45-74, 375-48-51, факс: (343) 375-94-62, e-mail: [d21228507@gmail.com](mailto:d21228507@gmail.com), [lerr@bk.ru](mailto:lerr@bk.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, д-р. техн. наук.

Аронсон К.Э.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** На сегодняшний день повышение эффективности турбомашин на переменных режимах работы является одной из приоритетных задач производителей и потребителей энергетического оборудования. Для стационарных газотурбинных установок (ГТУ) средней и большой мощности, работающих с постоянной частотой вращения компрессорного вала, большой резерв в повышении их эффективности заключается в рациональном использовании регулируемого входного направляющего аппарата (РВНА) осевого компрессора (ОК), обеспечивающего регулирование расхода воздуха.

С началом широкого применения одновальных энергетических ГТУ в парогазовых установках (ПГУ) поддержание постоянной температуры выхлопных газов на выходе из турбины во всём диапазоне мощностей стало иметь ещё большее значение. Без регулирования расхода циклового воздуха температура газов за ГТУ изменяется существенно, что может приводить к работе паровой турбины в составе ПГУ на скользящих параметрах пара, сопровождающихся снижением ресурса лопаточного аппарата паровой турбины. Таким образом, необходимо эффективное управление температурой продуктов сгорания за ГТУ, которое можно реализовать с помощью регулируемого входного направляющего аппарата осевого компрессора.

Как правило, изменение расхода воздуха через компрессор, работающий с постоянной частотой вращения, в первую очередь определяется положением лопаток РВНА, а все последующие поворотные венцы служат для лучшего согласования проходных сечений. В связи с этим исследование возможностей эффективного регулирования компрессора и ГТУ в целом при помощи одного венца поворотных лопаток (РВНА) представляет наибольший интерес. Конструкции ОК с одним поворотным направляющим аппаратом широко распространены как в приводных, так и в энергетических ГТУ.

Применение РВНА в широком диапазоне изменения углов установки лопаток сопровождается снижением КПД проточной части осевого компрессора, что не позволяет максимально эффективно реализовать принцип

количественного регулирования. В некоторых случаях это приводит к недопустимому снижению запаса газодинамической устойчивости компрессора (известны случаи аварийных остановов ГТУ, в том числе с разрушением лопаточного аппарата компрессора).

В этой связи актуальность работы, определяющая её цели и задачи, заключается во всестороннем исследовании возможных способов повышения эффективности и газодинамической устойчивости работы первой ступени осевого компрессора с регулируемым входным направляющим аппаратом во всём диапазоне переменных и переходных режимов.

**Цель работы:** повышение эффективности работы первой ступени осевого компрессора ГТУ с регулируемым входным направляющим аппаратом. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Исследовать характерные особенности работы первой ступени осевого компрессора, регулируемого только одним рядом поворотных лопаток статора - РВНА. Определить критические параметры, определяющие диапазон регулирования, а также влияющие на эффективность работы ступени на переменных режимах.

2. Разработать рекомендации по проектированию входной ступени осевого компрессора стационарной ГТУ, работающей с постоянной частотой вращения компрессорного вала.

3. Разработать алгоритм проектирования осевой компрессорной ступени с РВНА для максимально широкого диапазона возможных параметров ступени с учётом выработанных рекомендаций.

4. Выполнить расчётное исследование с целью оценки эффективности и обоснованности предложенных рекомендаций на основе численного решения уравнений Навье-Стокса в трёхмерной постановке.

**Научная новизна работы** определяется тем, что:

1) разработана математическая модель процесса сжатия воздуха в компрессорной ступени, позволяющая оценить эффективность работы ступени при частичном и максимальном прикрытии лопаток РВНА;

2) на основании разработанной математической модели обоснованы пределы эффективной работы первой ступени осевого компрессора с РВНА при постоянной частоте вращения, необходимые для реализации программ управления ГТУ с поддержанием постоянной температуры на выходе из турбины;

3) рассмотрена целесообразность применения различных законов радиального равновесия в ступени с поворотными лопатками ВНА и обоснован выбор оптимального закона в зависимости от характеристических параметров ступени и предполагаемых режимов работы ОК;

4) разработан метод и реализован автоматизированный алгоритм проектирования осевой компрессорной ступени с РВНА, предусматривающий одновременный расчёт ступени более чем на один режим работы.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечена:

- использованием в процессе выполнения работы в качестве базовых наиболее современных апробированных и научно обоснованных программ и методик на основе численного трёхмерного анализа течений в лопаточных аппаратах турбомашин;

- верификацией разработанного метода проектирования на хорошо отработанных модельных ступенях.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

1. Выработаны рекомендации по проектированию входной компрессорной ступени с регулируемым входным направляющим аппаратом в части выбора геометрических и газодинамических параметров.

2. Разработан и реализован метод проектирования ступени осевого компрессора с РВНА, предназначенной для высокоэффективной работы в качестве первой ступени ОК энергетических и приводных ГТУ.

3. Отработана методика расчёта компрессорной ступени из условия эффективной работы на нескольких режимах, что позволит повысить экономичность осевых компрессоров на переменных режимах работы.

4. На основании отработанной методики предложены конструктивные мероприятия по модернизации первой ступени осевого компрессора

приводной газотурбинной установки ГТК 25ИР, позволяющие улучшить работу компрессора на переменных режимах.

**Личный вклад автора** заключается в научно-техническом обосновании поставленных целей и задач исследования, разработке математической модели исследуемой ступени, постановке и проведении расчётных исследований, направленных на выполнение поставленных задач; в разработке метода и автоматизации алгоритма пространственного проектирования компрессорной ступени, работающей в широком диапазоне углов установки лопаток РВНА; в обработке и анализе полученных результатов, а также разработке соответствующих рекомендаций.

**На защиту выносятся** следующие основные положения:

1. Результаты расчётов и их анализ, свидетельствующий о возможности создания первой ступени осевого компрессора с РВНА, работающей с высокой эффективностью и достаточным запасом газодинамической устойчивости в широком диапазоне изменения расхода воздуха в ОК за счёт регулирования положения лопаток РВНА.

2. Рекомендации по проектированию первой ступени осевого компрессора с РВНА, рассчитанной на работу при одновенечном регулировании расхода воздуха в режиме реального времени.

3. Метод проектирования компрессорной ступени, работающей с постоянной частотой вращения в широком диапазоне углов установки лопаток РВНА.

4. Автоматизированный алгоритм проектирования первой ступени, позволяющий в короткие сроки получить геометрическую модель модернизированной или вновь создаваемой ступени и в последующем верифицировать её в программном комплексе вычислительной газодинамики.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на:

- III научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин (Москва, 2006);
- Четырнадцатом международном симпозиуме «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования» (Санкт-Петербург, 2008);

- XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (Москва, 2008);
- LVI научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин, (Пермь, 2009);
- III Международной конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (Москва, 2009);
- Пятнадцатом международном симпозиуме «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования» (Санкт-Петербург, 2010).

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы используются ЗАО «Уральский турбинный завод» в процессе проектирования и модернизации ОК приводных и энергетических ГТУ. Результаты работы используются в учебном процессе подготовки специалистов, бакалавров и магистров Уральского федерального университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, *из них 4 статьи в реферируемых изданиях по списку ВАК.*

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по работе, списка использованной литературы, включающего 153 наименования. Работа изложена на 187 страницах, содержит 53 рисунка и 15 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, показаны научная и практическая значимость результатов.

**В первой главе** приведён аналитический обзор литературных источников, которые посвящены вопросам эксплуатации энергетических и приводных ГТУ с регулированием расхода циклового воздуха через компрессор, современным методикам проектирования и расчёта осевых компрессоров, а также экспериментальному исследованию осевых компрессорных ступеней на различных режимах работы. Исходя из

проведённого анализа литературных данных, с учётом поставленных целей сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе представлена физико-математическая модель для одно- и двухмерного анализа поведения ступени на режимах с прикрытыми лопатками РВНА. Модель построена на основании классического подхода, связанного с решением диаграммы скоростей, как на номинальном, так и на переменном режиме. Расчёты на переменном режиме по среднему радиусу проводились на основании модели, представленной на рис. 1. Основным допущением данной модели является то, что угол входа в рабочее колесо  $\beta_1$  изменяется в достаточно узком диапазоне при изменении угла установки лопаток РВНА. Это позволило считать  $\beta_1$  постоянным. Такое допущение считается возможным лишь для среднего радиуса.

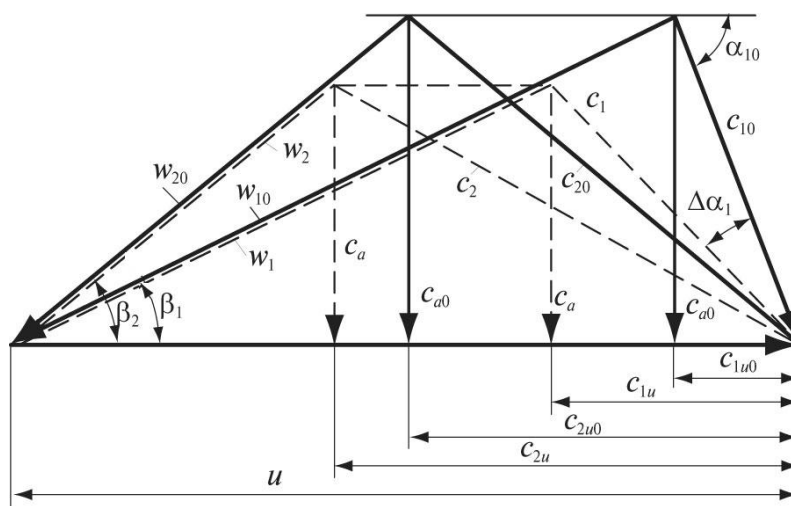


Рис. 1. Построение треугольников скоростей для регулируемой ступени. Сплошные линии – номинальный режим, пунктир – прикрытые лопатки ВНА

Для качественной оценки эффективности диффузорной решётки на этапе одномерного расчёта принято возможным использовать фактор диффузорности Либляйна и соответствующую распространённую методику.

Алгоритм расчёта на номинальном и переменном режиме был полностью автоматизирован, что позволило при задании исходных параметров ступени получать ключевые параметры на нескольких режимах работы. В соответствии с целями исследования все расчёты на каждом из этапов работы проводились следующим образом:



- для каждого набора значений характерных параметров проектируется компрессорная ступень, которая затем подлежит исследованию;
- оптимизация компрессорной ступени изначально ведётся с учётом её работы во всём диапазоне положений РВНА.

Большинство расчётов на всех стадиях работы проведено, как правило, для крайних положений РВНА: 0 и 100% максимального прикрытия поворотных лопаток. При этом ступень изначально проектируется на заданные параметры с номинальным положением лопаток РВНА. Диапазон характерных параметров ступени принят в следующих пределах:

- коэффициент расхода:  $\bar{c}_a = \frac{c_a}{u} = 0,35..1,00$ ;
- коэффициент теоретического напора:  $\bar{H}_{ст} = \frac{H_{ст}}{u^2} = 0,25..0,45$ ;
- угол входа потока в РК в абсолютном движении:  $\alpha_1 = 70..90^\circ$ .

Известно, что при соответствующем профилировании и ориентации профиля в потоке возможно обтекание профиля с минимальным уровнем потерь в диапазоне изменения угла входа в решётку до 10..15 градусов. Границы этого диапазона определяются газодинамическими (число Маха) и геометрическими (радиус входной кромки) параметрами. В качестве примера на рис. 2 представлены кривые, соответствующие основным параметрам ступени, при которых отклонение потока на входе в НА первой ступени получено на уровне 12 градусов относительно номинального режима при снижении расхода до 70% от номинального за счёт соответствующего прикрытия лопаток РВНА. Из рисунка видно, что при одинаковом расходе меньший коэффициент напора в ступени соответствует меньшему углу  $\alpha_{1ном}$  для сохранения  $i_{НА1}$  в указанном диапазоне.

В то же время известно, что при заданных характеристиках на среднем диаметре и известной геометрии требуемые параметры по радиусу для реальной ступени могут быть определены из условия радиального равновесия.

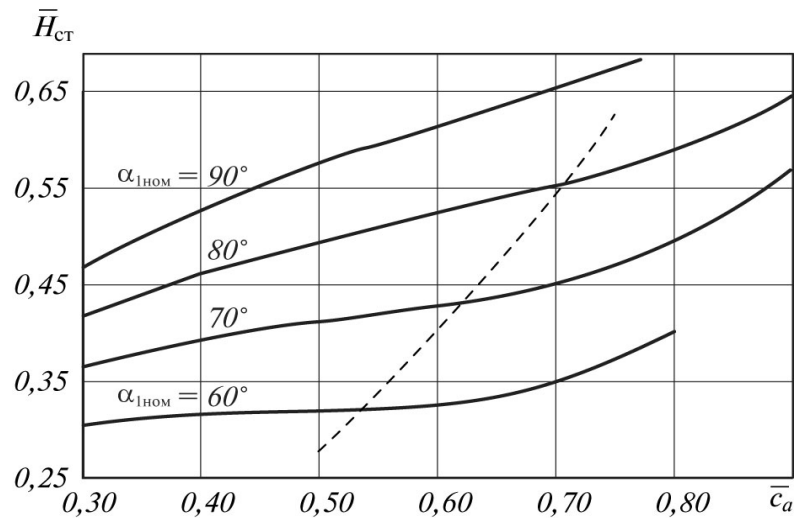


Рис. 2. Линии, соответствующие углу атаки на лопатках направляющего аппарата  $i_{\text{НА1}}=12^\circ$  в элементарной ступени для различного угла  $\alpha_{1\text{ном}}$

Также на рис. 2 для сопоставления пунктиром представлена кривая, соответствующая закону радиального равновесия в ступени компрессора на номинальном режиме. Эта кривая отражает условие радиального равновесия в ступени, в первом приближении, а именно постоянство по высоте расходной составляющей скорости и теоретической работы. Поскольку  $\bar{c}_a \sim \frac{1}{u}$ ,

$\bar{H}_{\text{ст}} \sim \frac{1}{u^2}$ , то эта линия в координатах  $\bar{H}_{\text{ст}} - \bar{c}_a$  будет представлять собой ветвь параболы, которая может смещаться вдоль осей путём изменения проектных параметров ступени на среднем радиусе.

Результаты проведённого исследования показали, что для обеспечения удовлетворительных условий обтекания по всей высоте лопатки, т.е. поддержания угла атаки на лопатках НА первой ступени в заданном диапазоне (при работе с прикрытым РВНА), необходим переменный по радиусу угол  $\alpha_{1\text{ном}}$ . Показано, что один из наиболее распространённых способов проектирования первой ступени - с постоянным по радиусу углом выхода из РВНА (из конструктивных соображений) – не может обеспечить удовлетворительную работу ступени при прикрытии лопаток РВНА.

В третьей главе проведен сравнительный анализ работы компрессорных ступеней с различными вариантами проектирования ступени по радиусу на переменном режиме. При расчёте ступени по радиусу получено, что далеко не все законы радиального равновесия в ступени позволяют сохранять постоянство отдельных параметров ступени на режиме регулирования.

На рис. 3 можно видеть результаты расчёта ступени с втулочным отношением 0,7 на режиме с максимально прикрытыми лопатками РВНА. По вертикальным осям слева представлена шкала теоретической работы в ступени на режиме прикрытия РВНА (в отношении к номинальной работе), а на правой шкале представлены значения углов атаки на лопатках НА первой ступени. На исследуемом режиме расход воздуха принят на уровне 70% от номинального. Расчёты проводились для различных законов радиального равновесия, которые в общем виде можно представить как:  $\frac{c_{1u} + c_{2u}}{2} r^m = const$ ,

где показатель степени  $m$  лежит в диапазоне  $m = -1..1$ . Этот показатель задаёт распределение по высоте параметров потока. Известно, что значение  $m=1$  соответствует постоянству по радиусу угла выхода из ВНА (в случае, если  $\alpha_{1cp} = 90^\circ$ ). В то же время  $m = -1$  соответствует постоянству по радиусу степени реактивности.

В ходе исследования установлено, что условие радиального равновесия, принятое на расчётном режиме, практически не выполняется на режиме с прикрытием лопаток РВНА. Однако для каждого сочетания характерных параметров ступени можно определить такой закон радиального равновесия, при котором для режима с максимально прикрытым РВНА будет соблюдаться постоянство по высоте одного из параметров. Показано, что можно обеспечить, например, постоянство по радиусу подводимой работы для крайних положений РВНА. Аналогичным образом возможно и обеспечение постоянства угла атаки на лопатках НА первой ступени и выдерживание этого параметра в пределах указанного диапазона (до 12..15 градусов).

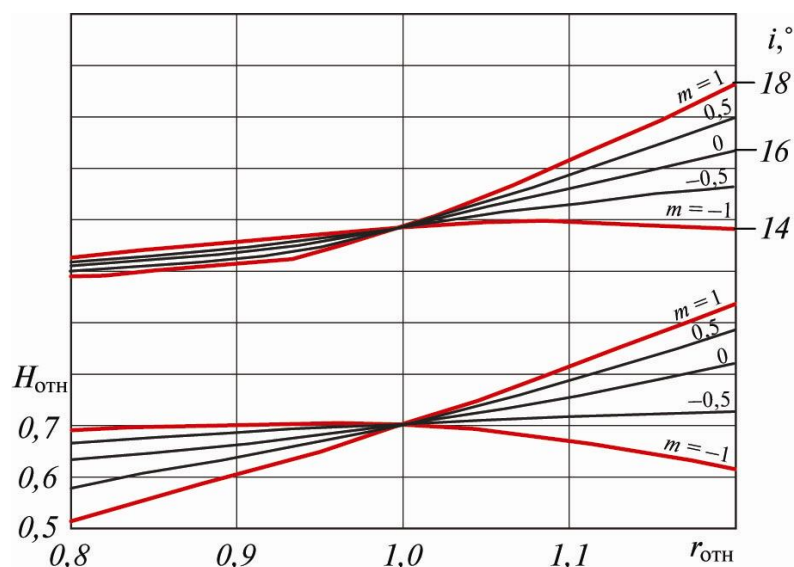


Рис. 3. Распределение по высоте ступени угла атаки на лопатках направляющего аппарата первой ступени и работы, подводимой на режиме максимального прикрытия РВНА для ступеней, спрофилированных по различным законам

По результатам исследования выработаны рекомендации по проектированию компрессорной ступени с РВНА, установлена взаимосвязь ключевых аэродинамических и геометрических параметров, обеспечивающая максимальную эффективность работы ступени с заданными параметрами.

**В четвертой главе** представлен разработанный автором автоматизированный алгоритм, позволяющий на основании исходных данных создавать ступень с РВНА, наилучшим образом удовлетворяющую требованиям эффективной работы на двух крайних (в соответствии с положением РВНА) режимах. В процессе работы над алгоритмом реализована возможность корректировки отдельных сечений для учёта, например, неравномерности потока на входе. Кроме того, на основании двухмерного расчёта проводится оценка аэродинамической эффективности ступени на различных режимах, отражается равномерность распределения ключевых параметров по высоте, а также для ступеней с большим втулочным отношением предусмотрена возможность корректировки сечений вблизи меридиональных обводов с целью более точного учёта концевых течений.

Для оценки качества проектируемой ступени и верификации автоматизированного алгоритма использован программный комплекс для численного решения уравнений Навье-Стокса Ansys CFX 11.0. Созданная трёхмерная модель была успешно импортирована в программный комплекс, далее были выполнены расчёты компрессорной ступени, включая построение расчётной сетки, задание граничных условий, непосредственно расчёт, обработка результатов.

Показано, что разработанный автоматизированный алгоритм проектирования полностью пригоден для профилирования компрессорных ступеней и может быть использован для дальнейших исследований в области совершенствования осевых компрессоров.

Верификация расчётов в программном комплексе в рамках исследования проведена на примере расчёта ступени Stage 35. Результаты испытаний по семейству ступеней 35,36,37,38 широко используются компаниями-разработчиками для верификации CFD-кодов. Сравнительные расчёты проводились для нескольких типов сеток, нескольких моделей турбулентности, а также с учётом радиальных зазоров. Автором сформирован принцип задания граничных условий, а также определены параметры расчёта компрессорной ступени в зависимости от режима её работы. По результатам анализа влияния различных параметров расчёта на точность полученных результатов сформирован подход, который в дальнейшем использован при расчётном анализе проектируемой ступени, а также возможной реальной конструкции. Сопоставление расчётных данных с результатами эксперимента представлено на рис. 4.

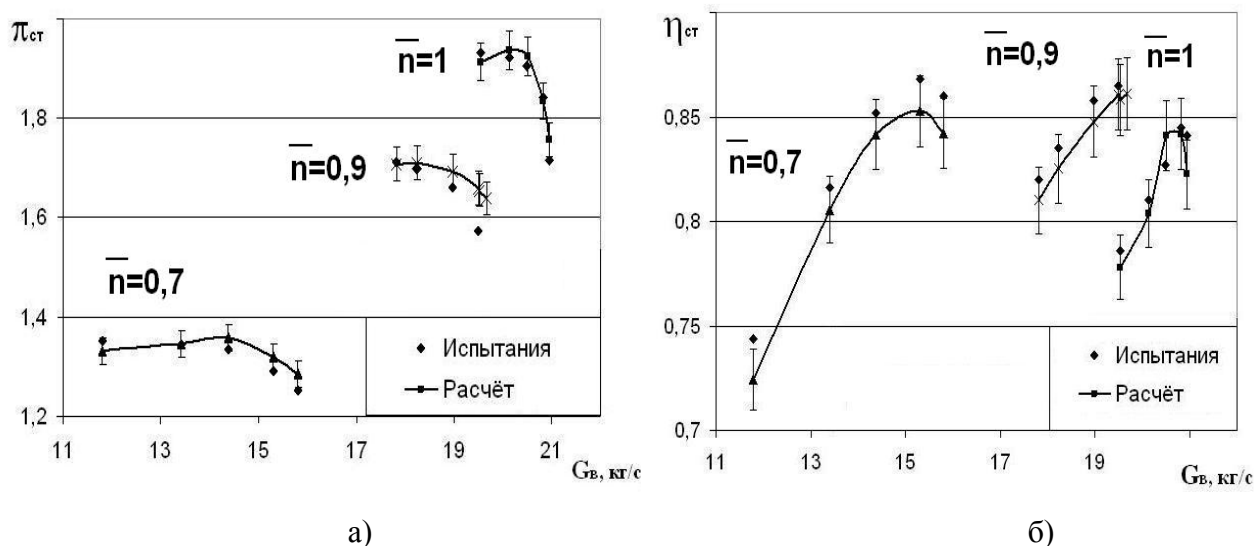


Рис. 4. Сопоставление расчётных данных с результатами эксперимента (а) - по степени повышения полного давления, (б) - по адиабатическому КПД

Установлено, что результаты расчётов находятся в хорошем согласовании с результатами экспериментов, а полученное отклонение (в пределах 1..2%) соответствует как максимально достижимой точности самого расчёта, так и точности проведённого эксперимента. Наибольшие отклонения

имеют место вблизи границы устойчивой работы ступени. Расхождения между экспериментальными и расчётными данными в рабочей точке составили:

- на номинальной частоте вращения ротора ОК не более 0,5% по степени повышения давления и 0,4% - по значению адиабатического КПД;
- на частоте вращения 90% от номинальной – 0,7% и 1,1% соответственно;
- на частоте вращения 70% – 0,9 и 1,2% соответственно.

Таким образом, разработанный автоматизированный алгоритм можно использовать для расчётного исследования и трёхмерной оптимизации входной компрессорной ступени с РВНА осевого компрессора в широком диапазоне рабочих режимов с возможностью прикрытия лопаток РВНА.

**В пятой главе** представлены результаты расчётного исследования входной ступени осевого компрессора газотурбинной установки ГТК-25И двух типов: 1) исходная конструкция; 2) ступень, спроектированная на основании метода, выработанного в ходе представленного исследования.

Результаты пространственного расчёта этих ступеней подтверждают выводы, сделанные при двухмерном исследовании. Так, например, работа исследуемых ступеней на режиме с полностью прикрытыми лопатками РВНА существенно отличается для этих вариантов, что показано на рисунках 5 и 6. На рис. 5 можно видеть распределение по радиусу полного избыточного давления на выходе из ступени. Распределение давлений представлено для обоих вариантов исследуемых ступеней на номинальном режиме (справа), а также на режиме с полностью прикрытыми лопатками РВНА (слева). Видно, что у ступени-прототипа наблюдается существенная неравномерность на переменном режиме работы. Полное давление на выходе из ступени с прикрытыми лопатками РВНА для ступени-прототипа существенно снижается в области корневого сечения и до 45% высоты ступени. Установлено, что в области корневого сечения на высоте до 0,4 от высоты канала на лопатках направляющего аппарата ступени-прототипа имеет место срыв потока с

поверхности лопаток (рис.6). Очевидно, что подобные отрывные течения носят нестационарный характер и в свою очередь существенно влияют на эффективность процесса сжатия и прочность лопаток. Особенно этот процесс опасен в связи с консольным закреплением лопаток направляющего аппарата первой ступени.

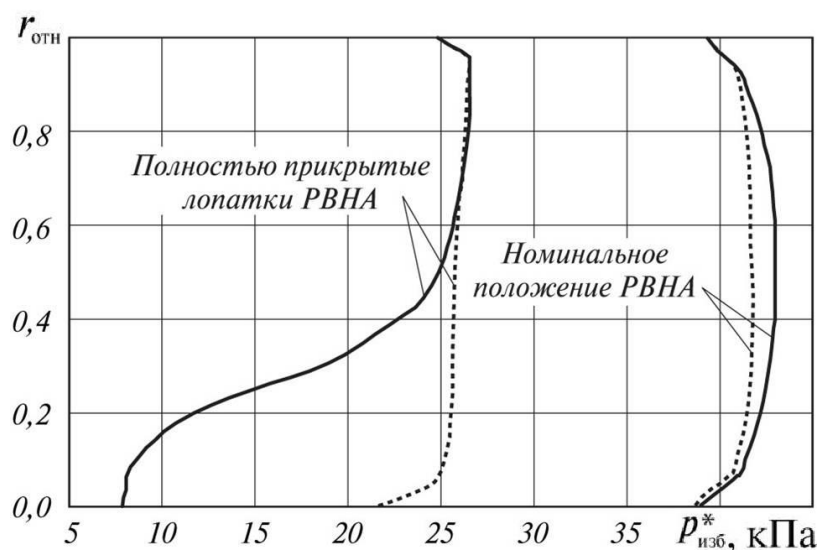


Рис. 5. Распределение по высоте полного давления на выходе из ступени: пунктир - спроектированная ступень

В то же время для спроектированной ступени удалось обеспечить равномерность параметров по высоте во всём диапазоне положений РВНА.

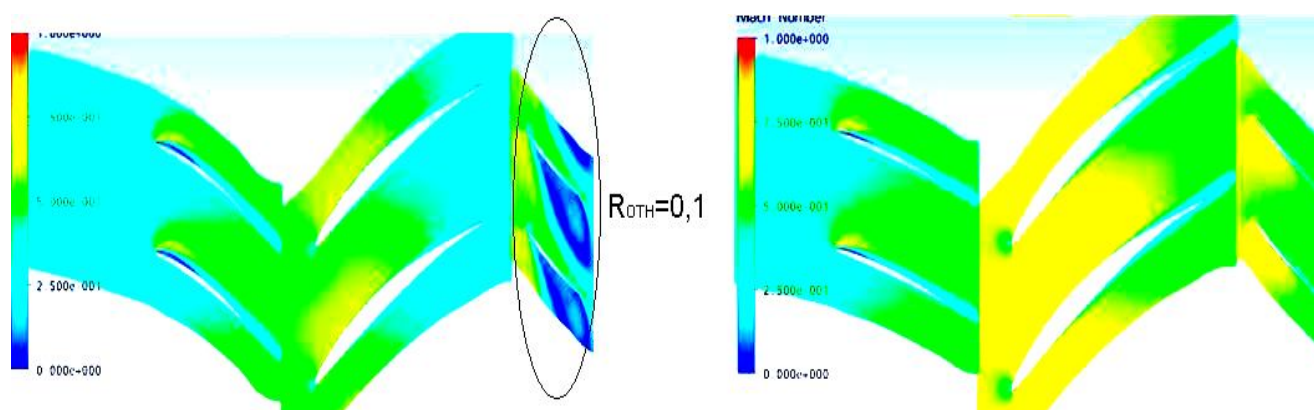


Рис. 6. Распределение числа Маха в корневом сечении ступени на режиме 70% от номинального расхода. Слева - ступень-прототип, справа - спроектированная ступень

Следующим этапом сравнительного анализа стало построение характеристики ступени в координатах расход-напор в соответствии с положением лопаток РВНА. На рис. 7 представлены дроссельные

характеристики двух ступеней, полученные расчётным путём. Кривые построены для трёх режимов работы:

- РВНА полностью открыт (номинальная изодрома);
- лопатки РВНА прикрыты таким образом, чтобы обеспечить максимальную степень повышения давления при 85% от номинального расхода воздуха;
- аналогично для 70% от номинального расхода воздуха.

Показано, что благодаря более эффективной работе в корне спроектированной ступени на переменных режимах работы, а также за счёт выравнивания теоретической подводимой работы по высоте удалось достигнуть более высокой степени повышения давления в ступени по сравнению со ступенью-прототипом. Так, степень повышения давления при 70% от номинального расхода воздуха для спроектированной ступени на 5% выше, чем для ступени-прототипа.

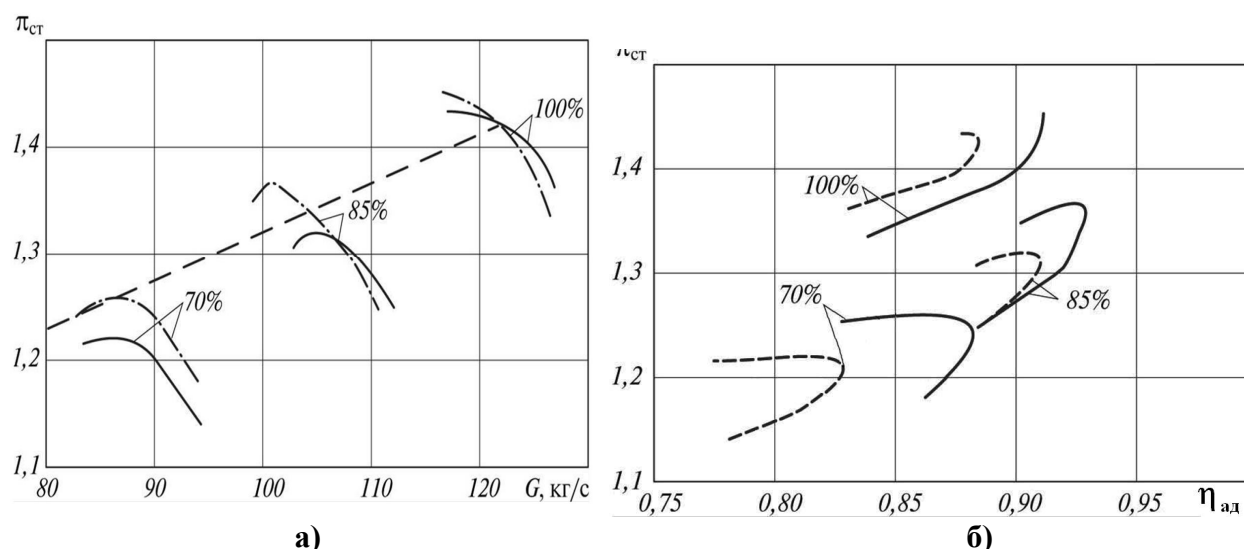


Рис. 7. Дроссельные характеристики исследуемых ступеней в координатах расход-напор (а) и КПД-напор (б) для двух положений лопаток РВНА. Пунктир - спроектированная ступень

Отдельно следует отметить улучшение эффективности работы ступени на номинальном режиме. На рис. 7 можно видеть, что для спроектированной ступени кривая КПД проходит несколько правее, что можно объяснить использованием иного закона радиального равновесия, позволяющего получить меньшие числа Маха на периферии и, как следствие, меньшие потери, связанные с трансзвуковым обтеканием в сравнении со ступенью-



прототипом. Полученный результат свидетельствует не только о сохранении параметров ступени на номинальном режиме, но и о повышении экономичности работы ступени.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Разработана математическая модель компрессорной ступени с РВНА, позволяющая оценить её эффективность на рабочих режимах эксплуатации. Модель составлена с использованием отработанных методик проектирования компрессорной ступени, а также рекомендаций по определению аэродинамических параметров ступени на режимах, отличных от номинального.

2. На основании выполненных численных исследований доказано, что однорядное регулирование осевого компрессора при постоянной частоте вращения ротора имеет существенный потенциал в повышении эффективности.

3. Доказана необходимость повышения запаса газодинамической устойчивости первых ступеней на режимах с полностью прикрытыми лопатками РВНА.

4. Вариантные расчёты компрессорной ступени с РВНА на основе разработанной автором математической модели позволили обосновать необходимость использования переменного по высоте профиля лопаток РВНА, а также специального профилирования первой ступени осевого компрессора.

5. Проведён двухмерный расчёт компрессорной ступени с РВНА с произвольной закруткой на номинальном и переменном режиме во всём диапазоне углов прикрытия лопаток РВНА. Исследованы принципы работы и проведена многофакторная оптимизация такой компрессорной ступени.

6. Разработан метод и алгоритм, предназначенный для создания пространственных моделей лопаточных венцов компрессорной ступени в

формате координат поверхности лопаток, в котором предусмотрена возможность учёта ограничений, накладываемых задачами проекта.

7. Отработан и верифицирован автоматизированный алгоритм пространственного расчёта течения воздуха в осевой компрессорной ступени с использованием программного комплекса, основанного на численном решении уравнений Навье-Стокса.

8. По результатам исследования выработаны рекомендации по проектированию первой ступени осевого компрессора, работающего с постоянной частотой вращения и регулируемого поворотом лопаток входного направляющего аппарата.

9. Результаты работы могут быть применены как для существующих, так и для вновь проектируемых осевых компрессоров, работающих с постоянной частотой вращения компрессорного вала. Наибольшую актуальность подобный способ регулирования имеет для повышения манёвренности и эффективности современных ГТУ в составе ПГУ.

10. Полученные принципы проектирования компрессорной ступени с РВНА могут быть распространены и на проектирование входной группы ступеней с несколькими поворотными венцами. При этом использование выработанных рекомендаций позволит снизить количество поворотных венцов при сохранении требуемого диапазона регулирования расхода и эффективности. Для существующих конструкций применение подобных принципов позволит существенно расширить диапазон регулирования, а также эффективность работы входной группы ступеней на переменных режимах работы.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

1. О регулировании осевого компрессора с постоянной частотой вращения в парогазовых энергетических установках / Б.С.Ревзин, А.В.Рожков, А.В.Скороходов, В.А.Седунин // Тезисы докладов ЛП научно-технической сессии по проблемам газовых турбин. М., РАН. 2006. С. 99-101.

2. Развитие работ по совершенствованию параметров входной регулируемой ступени осевого компрессора / Б.С.Ревзин, А.О.Прокопец, А.П.Парамонов, В.А.Седунин // Труды симпозиума «Потребители-производители компрессорного оборудования – 2008». Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. С.163-168.

3. Ермолаев В.В. К вопросу об эксплуатации ГТЭ-45 на режимах частичной мощности / В.В.Ермолаев, Ю.А.Русецкий, В.А.Седунин // Газотурбинные технологии. 2008. №7 (68), сентябрь С. 14-16.

4. Ермолаев В.В. Исследование эффективности использования установки ГТЭ-45 на режимах частичной мощности / В.В.Ермолаев, Ю.А.Русецкий, В.А.Седунин // тезисы докладов научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», Москва, 29-31 октября 2008 г. М., 2008. С. 39-40.

5. Ревзин Б.С. Оптимизация геометрических и аэродинамических параметров входной регулируемой ступени осевого компрессора энергетической ГТУ / Б.С.Ревзин, В.А.Седунин, А.П.Парамонов // тезисы докладов научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», Москва, 29-31 октября 2008 г. М., 2008. С. 77-78.

6. Rusetskii Yu. A. Numerical Investigation of GTE-45 Gas Turbine Unit Operation at Partial Load Regimes / Yu.A.Rusetskii, V.A.Sedunin, V.V.Ermolaev // Thermal Engineering. 2009. Vol. 56, No. 4. pp. 290–292.

7. Русецкий Ю.А. Расчётное исследование работы газотурбинной установки ГТЭ-45 на режимах частичной мощности / Ю.А.Русецкий, В.А.Седунин, В.В.Ермолаев // Теплоэнергетика. 2009. №4. С. 23-25.

8. О рациональности конструкторских решений по регулируемому входному направляющему аппарату компрессора ГТУ / Б.С.Ревзин, В.А.Седунин, А.П.Парамонов, А.О.Прокопец // Тяжелое машиностроение 2009. №4. С. 7-9.

9. Седунин В.А. Исследование возможностей регулирования расхода циклового воздуха с помощью однорядного поворотного направляющего аппарата в одновальной энергетической ГТУ / Седунин В.А.// LVI научно-техническая сессия РАН по проблемам газовых турбин: сборник тезисов докладов. Пермь, 8-10 сентября 2009 г. Пермь, 2009. С.33-36

10. Повышение эффективности работы газотурбинных ГПА, имеющих регулируемый входной направляющий аппарат осевого компрессора / А.О.Прокопец, Ю.М.Бродов, О.В.Комаров, В.А.Седунин // тезисы докладов III международной конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», Москва, 27-28 октября 2009 г., М., 2009. С. 106.

11. Исследование эффективности работы ступени осевого компрессора ГТУ с регулируемым входным направляющим аппаратом на переменных и переходных режимах / Ю.М.Бродов, О.В.Комаров, В.А.Седунин, А.О.Прокопец // труды симпозиума "Потребители-производители компрессорного оборудования -2010". Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2010. С. 225-228.

12. Проектирование первой ступени осевого компрессора ГТУ, работающей с регулируемым входным направляющим аппаратом / Ю.М.Бродов, О.В.Комаров, В.А.Седунин, А.О.Прокопец // Компрессорная техника и пневматика. 2011. №3. С. 9-12.

13. Вариантные расчеты первой ступени осевого компрессора ГТУ с регулируемым входным направляющим аппаратом / Ю.М.Бродов, О.В.Комаров, В.А.Седунин, А.О.Прокопец // Компрессорная техника и пневматика. 2011. №4. С.29-32.

---

Подписано в печать 14.08.2011

Формат 60х84 1/16

Бумага типографская. Плоская печать

Усл. печ.л. 1,39

Уч.-изд. л. 1,03      Тираж 100 экз.

Заказ \_\_\_\_

---

Ризография НИЧ ФГАОУ ВПО УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира,19